X CONGRESO INTERNACIONAL DE INGENIERIA DE PROYECTOS

VALENCIA, 13-15 Septiembre, 2006

METODOLOGÍA PARA DISEÑO Y AMPLIACIÓN DE REDES DE ABASTECIMIENTOS MEDIANTE ALGORITMOS GENÉTICOS

Daniel Mora Melía, Pedro L. Iglesias Rey, Vicente S. Fuertes Miquel,
F.Javier Martinez Solano

Abstract

The Genetic Algorithms are an optimization technique used for the design of water distribution networks. This work introduces a new modified pseudo-genetic algorithm (APG), whose main characteristic is a change in the chains codification, which is made in a numerical way instead of the classic binary codification. This variation entails a serie of special characteristics, both in the codification and in the definition of the cross and mutation´s operations.

Initially, the work demonstrates the kindness of the method on the network of the Hanoi Towers, widely studied in the bibliography. In the second part, this algorithm is applied to approach the real extension of the suplying network in a Cantabria´s municipality (Spain).. Also, a statistical analysis of the obtained solutions is made. Thus allows to verify the best probability values of suitable mutation and crossing for the proposed method. In the study of the analyzed suplying networks is introduced the concept of reliability, fundamental to understand the validity of the obtained results.

Keywords: Genetic algorithms, design, water networks, reliability.

Resumen

Los algoritmos genéticos son una técnica de optimización empleada para el diseño de redes de abastecimiento de agua. Éste trabajo presenta un nuevo algoritmo pseudogenético modificado (APG), cuya principal variación respecto a un AG es un cambio en la codificación de las cadenas, que se realiza de forma numérica en lugar de la codificación binaria clásica. Esta variación conlleva una serie de características especiales tanto en la codificación como en la definición de las operaciones de mutación y cruce.

Inicialmente, el trabajo demuestra la bondad del método sobre la red de las Torres de Hanoi, ampliamente estudiada en la bibliografía. En una segunda parte, se aplica dicho algoritmo para abordar la ampliación real de la red de abastecimiento de un municipio sito en Cantabria (España). Asimismo, se realiza un análisis estadístico de las soluciones obtenidas, el cual permite verificar los valores de probabilidad de mutación y de cruce más adecuados para el método propuesto. En el estudio de las redes de abastecimiento analizadas se introduce el concepto de fiabilidad, fundamental para comprender la validez de los resultados obtenidos.

Palabras clave: algoritmos genéticos, diseño, redes de abastecimiento de agua, fiabilidad.

1. Introducción

El presente trabajo se centra en el diseño económico de una red de distribución de agua, la cual debe quedar incorporada a la ya existente, de modo que el sistema cumpla las

condiciones de presión mínima que se le impongan. Dicho diseño se realiza en base a una metodología heurística como son los algoritmos genéticos.

La resolución óptima del diseño de sistemas de distribución de agua resulta extremadamente compleja o incluso imposible. Esto es debido a que cuando se escogen como variables de decisión los diámetros de las conducciones, las restricciones son funciones implícitas de dichas variables de decisión, con lo que la región del espacio de posibles soluciones es de tipo no convexo y la función objetivo se vuelve multimodal. La aplicación de técnicas estocásticas de optimización tales como los algoritmos genéticos (AG) permiten la búsqueda más allá de mínimos locales, lo que amplia en muchas ocasiones el campo de búsqueda, y por ello, la capacidad de obtener buenas soluciones.

El algoritmo genético es una técnica de búsqueda basada en la teoría de la evolución de Darwin. Su forma de trabajo es idéntica a la evolución de una población de individuos que es sometida a acciones aleatorias semejantes a las que actúan en la evolución biológica (mutaciones y recombinación genética), así como también a una selección de acuerdo con algún criterio, en función del cual se decide cuáles son los individuos más adaptados, que sobreviven, y cuáles los menos aptos, que son descartados.

En el campo de la ingeniería hidráulica, la obra de Savic (1999) hace patente la importancia que estos algoritmos están adoptando en este tipo de aplicaciones, encontrando soluciones a problemas como los reemplazamientos de tuberías principales en sistemas de distribución de agua (Engelhard 1999), optimización de sistemas de distribución (Farmani 1999), rehabilitación en sistemas de distribución (Halhal 1999), diseño y ampliación de Redes de Distribución de Agua (Iglesias y otros 2006), e incluso ubicación en cuencas receptoras de plantas de depuración de aguas (Wang).

El objetivo es minimizar los costes de inversión necesarios para la implantación de un determinado sistema a partir del trazado topológico y de las demandas y requerimientos de presión en los nudos. El método propuesto difiere de trabajos anteriores en desarrollar un código basado en la utilización de cadenas numéricas en lugar de cadenas binarias. La diferencia fundamental estriba en la capacidad de adaptarse a los requerimientos de diferentes rangos de valores para cada una de las variables de decisión.

2. Metodología

Tradicionalmente, los AG han sido métodos adecuados para problemas formulados en variables binarias y en los que otros métodos de búsqueda no resultan convenientes. No obstante, en el presente trabajo se introducirá una formulación del problema basándose en una codificación numérica, no binaria, de la solución.

La mayoría de las técnicas de búsqueda convencionales parten de una solución factible que se intenta mejorar desplazándose en la dirección que implica una mejora en la función objetivo. Los AG se basan en la exploración aleatoria del espacio de soluciones, por lo que resultan adecuados para el diseño de redes de distribución de agua. Dicho carácter aleatorio no garantiza una exploración completa del espacio de soluciones, ni supone garantía alguna de alcanzar un mínimo de la función objetivo. No obstante, el método ofrece un conjunto de “buenas” soluciones que intentan mejorarse poco a poco.

El eslabón es la unidad básica de información que adopta un valor binario (0/1). En el método que se propone cada una de las variables de decisión puede tener un rango de soluciones posible diferente, lo que se representa mediante una variable alfanumérica. Con esta codificación es posible el identificar cada eslabón con una variable de decisión, cosa que no ocurre en los AG convencionales. En el diseño de redes de abastecimiento, cada eslabón queda representado mediante un número o letra, que identifica la solución del diámetro de cada una de las líneas (ver Figura 1)

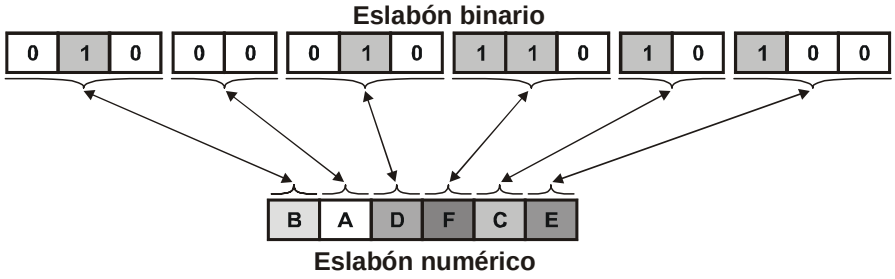

Figura 1. Definición de la cadena y eslabones de un algoritmo genético (AG) y del algoritmo pseudogenético propuesto (APG)

Una cadena representa simbólicamente una solución del problema. Está constituida por una serie de eslabones que definen de forma biunívoca una única solución del proceso de optimización. En el caso de diseñar tan sólo el diseño de una red de abastecimiento sin bombeos ni válvulas, los eslabones son la representación del diámetro que adopta cada conducción en cada una de las soluciones.

Para resolver el problema de optimización es necesario disponer de un conjunto discreto de posibles soluciones (cadenas). Este conjunto de cadenas es lo que forma la población del AG y también del APG. En el APG una cadena X genérica está constituida por un número de eslabones igual al número de variables de decisión (N_{VD}), de forma que la cadena genérica i de una población P se define como un vector de valores numéricos.

$$X^i = \left\{X_1^i, X_2^i, \ldots, X_{N_{VD}}^i\right\} \tag{1}$$

La aptitud de cierta cadena genérica X^i se identifica a través del valor que adopta la función objetivo para la solución codificada. En el caso del APG propuesto para diseño y ampliación de redes de abastecimiento dicha función objetivo se define como

$$F(X^i) = \sum_{j=1}^{N_{VD}} C_j\left(X_j^i\right)\cdot L_j + \lambda \cdot \sum_{s=1}^{N_S}\sum_{k=1}^{N_R} \delta_{k.s}\cdot\left(H_{min,k} - H_{k,s}\right) \tag{2}$$

donde C_j es el coste unitario asociado al valor de la variable de decisión contenida en el eslabón j de la cadena i; y L_j es la longitud de conducción de la tubería j. Asimismo existen N_R restricciones impuestas que deben cumplir las posibles soluciones del problema. Estas restricciones se han incluido mediante una penalización en el coste total de la solución que afecta posteriormente a la aptitud de la cadena. Las restricciones que deben cumplirse son las derivadas de satisfacer las restricciones de altura de presión mínima ($H_{min,k}$) en cada nudo k. Estas restricciones deben verificarse en todos los escenarios N_S analizados, que usualmente son el funcionamiento normal del sistema y su funcionamiento bajo el escenario de fallo de alguna de las conducciones. La función penalización representa la diferencia entre la altura piezométrica del nudo k en el escenario s ($H_{k,s}$) y la altura mínima requerida ($H_{min,k}$). Para computar dicha penalización se definen dos variables. Una de ellas ($\delta_{k,s}$) es una variable binaria que adopta el valor 1 si $H_{k,s} < H_{min,k}$ y adopta valor nulo en caso contrario. La otra λ representa una función de peso que establece el valor de la penalización por no verificarse las restricciones de presión mínima en los nudos.

Para comenzar el cálculo, se genera aleatóriamente una serie de cromosomas, procediendo el algoritmo genético de la siguiente forma:

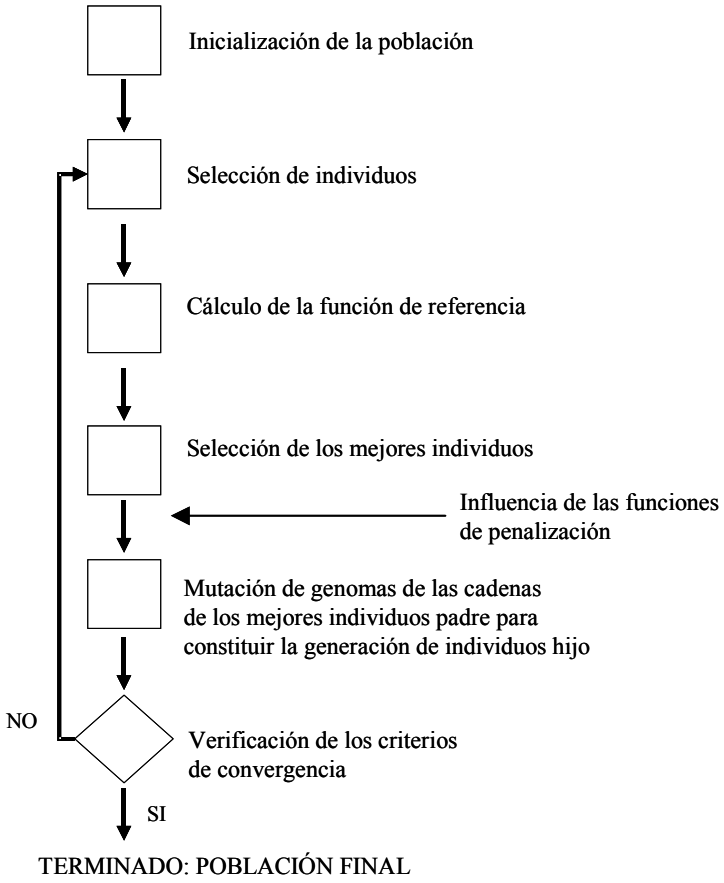
Inicialización de la población
Selección de individuos
Cálculo de la función de referencia
Selección de los mejores individuos
Influencia de las funciones de penalización
Mutación de genomas de las cadenas de los mejores individuos padre para constituir la generación de individuos hijo
NO
Verificación de los criterios de convergencia
SI
TERMINADO: POBLACIÓN FINAL

Figura 2. Diagrama de flujo acerca del funcionamiento de un Algoritmo Genético

La reproducción es el proceso por el cual se seleccionan de entre la N_C cadenas de la población P cuáles serán aquellas que sobrevivirán a la siguiente generación. De entre todos los métodos de reproducción existentes (Matias 2003) se ha seleccionado el método de reproducción constante. Este método asigna a cada cadena de la población una probabilidad de selección para formar parte de la siguiente generación. Dicha probabilidad depende del orden según el coste de la cadena dentro de la población, y debe estar comprendida entre una probabilidad máxima p_{max}, asociada al individuo de coste menor, y una probabilidad mínima, asociada a la solución de coste mayor. Ambas probabilidades se definen como

$$p_{\max} = \frac{\beta}{N_C} \qquad p_{\min} = \frac{2-\beta}{N_C} \tag{3}$$

donde β es una constante cuyo valor debe estar comprendido entre 1,5 y 2.

El proceso de cruce escoge aleatóriamente dos miembros de la población. No tiene importancia si se emparejan dos descendientes de los mismos padres, puesto que ello garantiza la perpetuación de un individuo con buena puntuación.

Si la codificación es binaria, al realizar el cruce la selección aleatoria del eslabón de cruce determina el punto donde se trocean las cadenas para cruzarlas entre si. Esto puede originar la fracción del código binario que identifica una de las posibles variables de decisión. En el caso de implementar el APG la selección de un eslabón de cruce no genera este

efecto. Es por ello que la utilización de los APG genera menos posibilidad de cambio en las soluciones finales que los AG clásicos.

El proceso de mutación se aplica a la población intermedia obtenida tras el proceso de reproducción y de cruce. Una vez establecida la frecuencia de mutación, por ejemplo, uno por mil, se examina cada eslabón de cada cadena cuando se crea un individuo a partir de sus padres. Si un número generado aleatóriamente está por debajo de esa probabilidad, se cambiará el eslabón. Si no, se dejará como está.

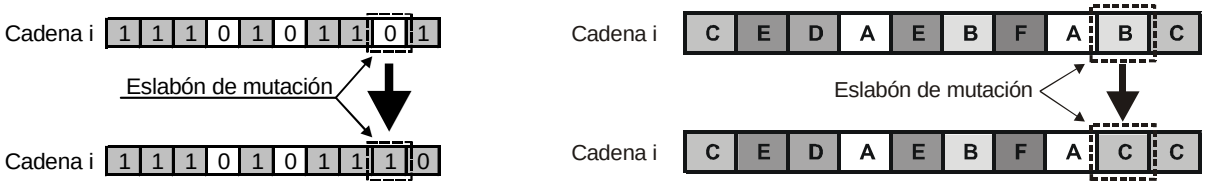
Cadena i
1 1 1 0 1 0 1 1 0 1
Eslabón de mutación
Cadena i
1 1 1 0 1 0 1 1 1 0
Cadena i
C E D A E B F A B C
Eslabón de mutación
Cadena i
C E D A E B F A C C

Figura 3. Proceso de mutación de un AG y de un APG

En el caso del APG, una vez determinado el eslabón de mutación se determina aleatóriamente si dicho bit debe incrementarse o decrementarse. Por ello, la probabilidad de mutación en el APG es ligeramente superior.

Todos los cálculos se realizan mediante el programa SARA, desarrollado en el Grupo Multidisciplinar de Modelación de Fluidos de la Universidad Politécnica de Valencia, cuyos fundamentos pueden seguirse en Iglesias (2001). El tratamiento masivo de simulaciones para obtener los parámetros del APG se ha realizado mediante una aplicación específica, tal como se describe en Iglesias (2003).

3. Caso de Estudio

Los estudios preliminares del modelo propuesto se realizaron sobre la red de las Torres de Hanoi, propuesta por Fujiwara y Khang (1990). Dicha red es un trazado real del cual se disponen diferentes soluciones en la bibliografía con distintos modelos, lo que ha permitido contrastar los resultados obtenidos con el APG presentado.

Uno de los aspectos que contribuye a definir la solución óptima de la red es la gama de diámetros candidatos empleados. Para el estudio se emplea la gama original utilizada en la bibliografía. En el trabajo presentado por Iglesias y otros (2006) se recogen ampliamente los resultados obtenidos por los distintos investigadores, así como los obtenidos mediante la tecnología propuesta.

Para determinar la influencia que tienen la probabilidad de mutación y cruce en la obtención del valor mínimo de coste se adoptó como valor óptimo de diseño la solución correspondiente a 6081 miles de unidades monetarias, que fue la mínima obtenida. Al analizar estadísticamente los datos obtenidos se pone de manifiesto que determinadas combinaciones de cruce y mutación generan tasas de éxito mayores en la obtención del óptimo. Concretamente se observa que para una probabilidad de mutación del 3-4% (algo más de un eslabón por cadena) se tiene aproximadamente un 10-12% de posibilidades de obtener el mínimo.

La conclusión principal es que el APG iguala o mejora los resultados anteriores de otros investigadores, siempre que cumplan las condiciones de presión impuestas. Al introducir el concepto de fiabilidad el coste de la red crece, circunstancia lógica, puesto que los diámetros para garantizar el suministro en caso de rotura deben ser mayores. No obstante, el tener en cuenta dicho concepto es necesario.

Una vez probada la eficacia del APG se realiza el análisis de la red actual de suministro de una población situada en Cantabria (España), puesto que debido a la construcción de una nueva urbanización se hace necesario ampliar la red de abastecimiento.

El análisis de la red se lleva a cabo a partir de la información suministrada por las instituciones, que comprende todos los datos topográficos de la red, donde se muestran los trazados de las conducciones, sus diámetros y secciones, así como el perfil de cada tramo y detalles de los aliviaderos, pozos, depósitos y demás elementos singulares. Así, a partir de los diámetros de las conducciones y el consumo en cada nudo es posible realizar una simulación de la red para conocer tanto los caudales circulantes como la presión existente en cada uno de los nudos en el momento actual.

El siguiente paso consistió en realizar una esqueletización de la red, de modo que en el diseño final a introducir en los AG tan sólo quedaran redes malladas. Esto se consigue acumulando los caudales circulantes por las redes ramificadas en el nudo de partida de la red mallada correspondiente. La ventaja de realizar esta operación es la simplificación de la red, permitiendo así una mayor velocidad de cálculo al simular la red con los AG.

A la red ya existente se le añade el diseño realizado para la urbanización de nueva construcción. De este modo, el esquema de la red simplificada, a la que se le une el proyecto de ampliación se puede observar en la figura 4.

En el caso del proyecto de ampliación real a abordar no es necesario rediseñar los diámetros de toda la red, sino tan sólo la ampliación en si. El programa calculará tan sólo las líneas añadidas, de modo que queden cumplidos los requerimientos mínimos de presión, asegurando así el abastecimiento de la población.

El material elegido para las tuberías ha sido un PE de alta densidad. En la Tabla 1 se muestra la gama de diámetros elegidos, así como el coste asociado a cada metro de tubería.

Nº diámetro	**Diámetro**	**Coste (€/m)**	**Nº diámetro**	**Diámetro**	**Coste (€/m)**
A	50	2,3	G	140	16,52
B	63	3,42	H	160	21,68
C	75	4,77	I	180	27,39
D	90	6,91	J	200	33,76
E	110	10,23	K	250	57,74
F	125	13,26			

Tabla 1. Gama de diámetros utilizada para el diseño de la red

La presión mínima exigida a la red es de 25 mca, por lo que todos los nudos de la red de ampliación diseñada deben cumplir dicha presión. El reducido tamaño de la red permite cierta agilidad de cálculo, puesto que el número de líneas diseñadas es tan sólo veintitrés. Otra opción posible habría sido diseñar una rehabilitación para toda la red del municipio.

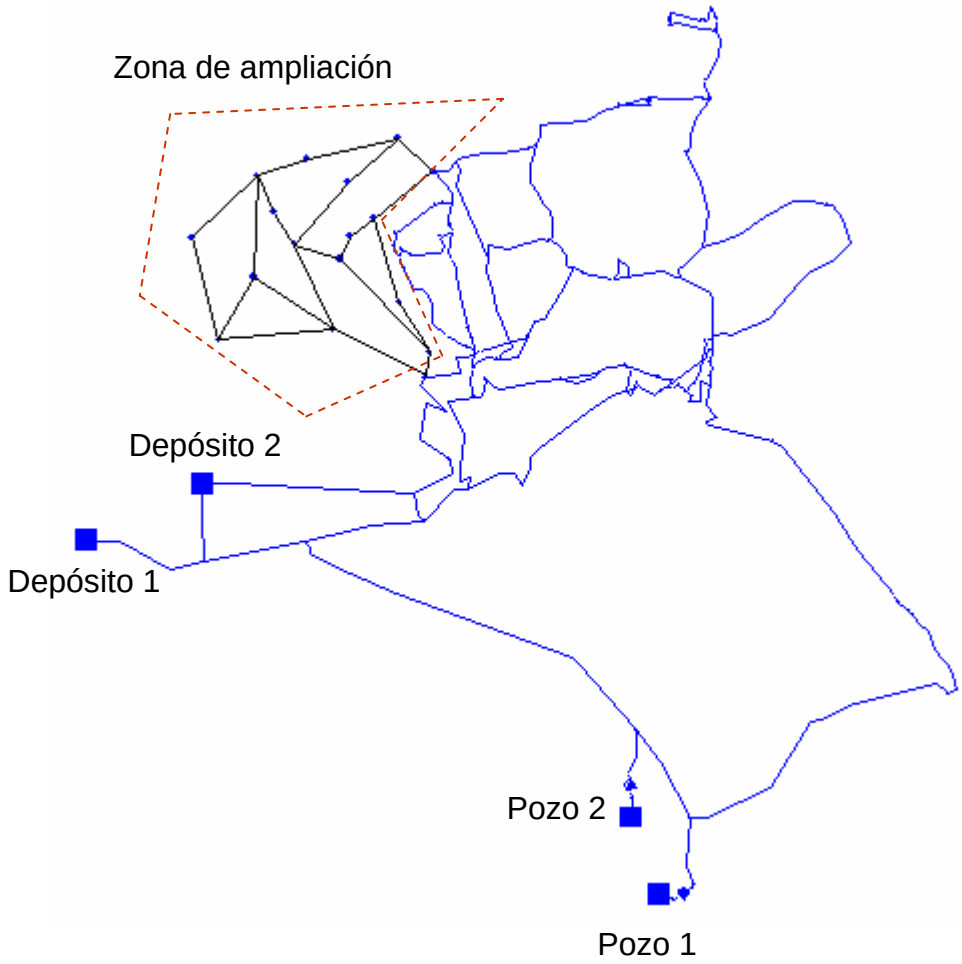

Figura 4. Propuesta de ampliación de la red estudiada

Cabe destacar que al no tener datos previos de la red no se podrá asegurar que con las simulaciones realizadas hayamos alcanzado el óptimo, sino que tan sólo podremos hablar de los conceptos de mínimo y de buena solución, entendiendo por este último toda solución que tan sólo suponga un 1% de más al valor mínimo obtenido.

El diseño con fiabilidad implica que en caso de rotura o avería en una de las conducciones se verificarán las restricciones de presión mínima en los nudos. El no tener en cuenta dicho concepto entraría en contradicción con el diseño de una red mallada, donde el trazado de la red trata de garantizar el suministro en caso de fallo.

En la Tabla 3 se recoge el resultado de aplicar el criterio de fiabilidad de suministro a la red, mostrándose las cinco mejores soluciones para el diseño planteado. Cabe destacar que en el diseño con fiabilidad realizado no se han añadido aspectos de ésta relacionados con la calidad del agua, considerándose tan sólo la habilidad del sistema para proporcionar la cantidad de agua requerida por los consumidores. El fallo de la red desde un punto de vista cuantitativo se basa en la insuficiencia de presión cuando la demanda es suministrada. De este modo, cuando algún componente de la red falla (por ejemplo rotura de una tubería), normalmente la respuesta de la red es una caída de presión en uno o varios nudos.

En un diseño con fiabilidad, el algoritmo tiene que hacer un mayor número de cálculos, con lo que el tiempo que tarda en realizar una simulación siempre es mayor que si no se tiene en cuenta el término de fiabilidad. Las simulaciones son costosas temporalmente hablando, por lo que se ha utilizado un sistema de computación distribuida con 23 ordenadores AMD Duron a 1400 MHz y 128 Mb de RAM. Aproximadamente cada una de las simulaciones cuesta del orden de las 3-4 horas.

	Mejores soluciones obtenidas (Euros)					
Línea	**60578,91**	**60656,5**	**60718,5**	**60780,1**	**60811,7**	**60824,8**
886	50	63	50	50	50	63
887	75	75	75	75	75	75
888	90	90	90	110	90	90
889	140	140	140	125	125	140
890	110	110	110	110	110	110
891	63	63	63	63	63	63
892	90	90	75	90	90	90
893	50	50	50	50	50	63
895	63	63	63	63	63	50
896	180	180	180	180	180	180
897	180	180	180	180	180	180
898	63	63	63	63	63	63
899	75	63	63	63	75	75
900	125	125	125	125	125	125
901	75	75	75	75	90	75
902	160	160	160	160	160	160
903	180	180	180	180	200	180
904	140	140	140	140	125	140
905	140	140	160	140	140	140
906	110	110	110	110	110	110
907	110	110	110	110	110	110
908	125	125	125	125	125	125
909	50	50	50	50	50	50

En todas las soluciones se considera la fiabilidad del sistema. Se destacan en sombreado los diámetros que son diferentes respecto de la solución con coste mínimo obtenida que verifica las restricciones de presión en los nudos.

Tabla 2. Soluciones obtenidas para la red

4. Análisis estadístico de los resultados obtenidos mediante el APG

Una de las principales características que presentan los AG es su carácter aleatorio, de modo que no es posible garantizar con certeza la obtención del óptimo del sistema. Para analizar dicha aleatoriedad se ha realizado un análisis estadístico donde se analiza la influencia que tienen los distintos parámetros en la solución de la red analizada.

De este modo, se han llevado a cabo más de 5000 simulaciones, fijando la población inicial en 100 individuos y variando las tasas de mutación y cruce. Así pues, se ha variado la tasa de mutación desde un 1 hasta un 9%, y la tasa de cruce entre un 10 y un 90%.

Inicialmente se realiza un histograma, que incorpora además el gráfico de probabilidad acumulada de las soluciones obtenidas. Dicho gráfico permite detectar aquellas soluciones más frecuentes, así como determinar la probabilidad de obtener una solución mejor a una dada. Es importante tener en cuenta que el histograma representa la totalidad de costes obtenidos, con lo que se están incluyendo aquellas combinaciones de mutación y cruce que peor funcionan, con lo que es lógico que el número de valores correspondientes al coste mínimo no sea muy alto.

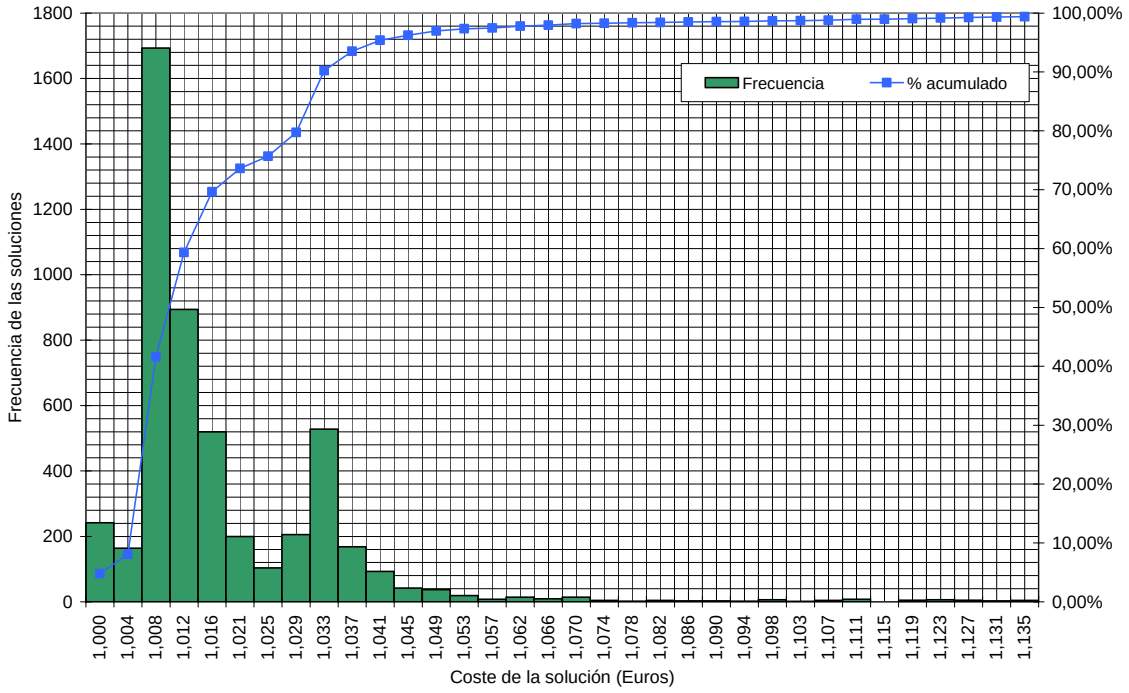

Figura 5. Diagrama de frecuencias y probabilidad acumulada de las soluciones obtenidas.

Para determinar la influencia que tiene la probabilidad de mutación y de cruce en la obtención del coste mínimo de diseño se adopta como valor óptimo de diseño la solución correspondiente a 60578,91 €. Se analiza entonces para cada combinación de los valores de mutación y cruce la probabilidad de que el APG encuentre el mínimo. La representación de esta tasa de éxito se aprecia en la Figura 6, donde queda de manifiesto que existen combinaciones de valores con una probabilidad mínima de obtención del óptimo. La tasa de éxito máxima en la obtención del óptimo se obtiene para una probabilidad de mutación en torno al 4-5%, que en este caso equivale aproximadamente a la mutación de un eslabón por cadena, no siendo tan importante a priori la probabilidad de cruce**.**

Una de las principales características que posee el APG es que en la mayoría de las combinaciones posibles se puede llegar a obtener una buena solución. Se entenderá como

buena solución aquella cuyo coste asociado presente un sobrecoste respecto de la solución óptima inferior al 1%. La Figura 7 recoge la probabilidad de obtener una “solución buena” para cada combinación de valores de la probabilidad de mutación y cruce.

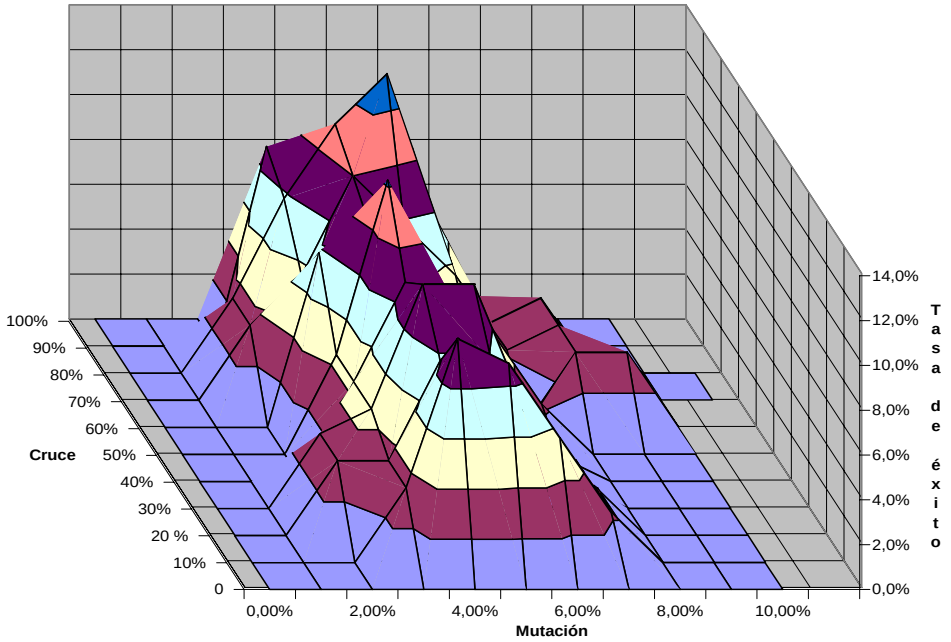

Figura 6. Probabilidad de obtención del mínimo según parámetros de cruce y mutación

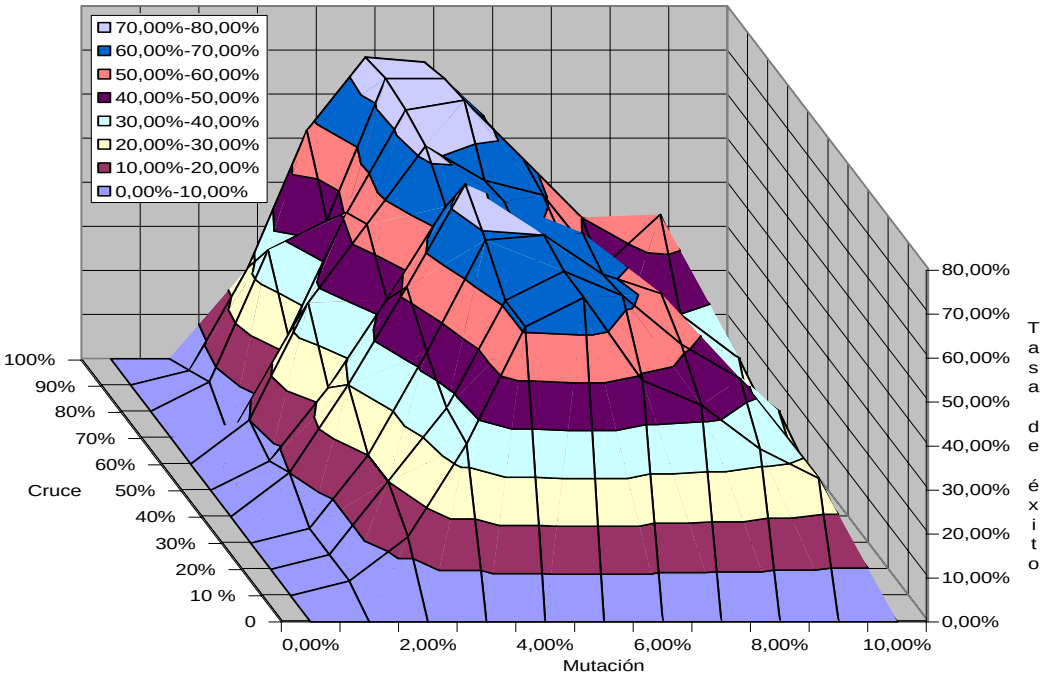

Figura 7. Probabilidad de obtención de una buena solución según parámetros de cruce y mutación

5. Conclusiones

El principal objetivo de este trabajo consiste en realizar el diseño de una red de distribución de agua, utilizando para ello un método basado en un APG. El diseño económico en las Redes de Distribución de Agua es de gran interés si se tiene presente que nos permite elegir una solución entre las distintas alternativas que verifican los condicionantes hidráulicos impuestos para el dimensionado.

El considerar la fiabilidad aumenta los costes económicos del diseño, pero a cambio se obtiene un aumento considerable de seguridad en la red frente a potenciales fallos. Es por ello que la solución –diseño- resultante será función del grado de fiabilidad que se pretenda para el sistema. Así, del análisis estadístico para el modelo propuesto se extraen las siguientes conclusiones:

- La codificación empleada simplifica la definición del problema, puesto que permite un número variable de estados en cada eslabón y tiene una convergencia más rápida que un AG clásico (Iglesias y otros, 2004). El APG propuesto genera resultados óptimos tan buenos, e incluso mejores que los obtenidos por otros autores sobre las mismas redes de abastecimiento.
- El análisis estadístico realizado permite establecer la tasa de éxito del sistema, tanto para el caso de obtención de soluciones de coste mínimo como en la obtención de buenas soluciones que difieren una cantidad inferior al 1%.
- La probabilidad de mutación es el parámetro más sensible a la hora de obtener las mejores soluciones, presentando la probabilidad de cruce una mayor robustez en el APG propuesto.

En conclusión, se puede afirmar que el modelo propuesto parece válido para el diseño de redes de abastecimiento de agua, siendo el ajuste de los parámetros población, cruce y mutación el principal condicionante para la obtención de buenos resultados. En el presente trabajo se ha fijado la población, optimizándose tan sólo las probabilidades de cruce y mutación.

Referencias

[1] ASPEROVITS, E. y SHAMIR, U. (1977). “Design of Optimal Water Distribution Systems”. Water Resource Research, Vol 12 nº 6, 885-900.

[2] CUNHA, M.C.; SOUSA, J. (1999) “Water distribution networks design optimization: simulated annealing approach”. Journal of Water Resources Planning and Management. July/August 1999. pp. 215 – 221.

[3] EIGER, G.; SHAMIR, U.; BEN-TAL, A. (1994). “Optimal design of water distribution systems”. Water Resource Research. Vol. 30. nº 9. pp. 2637-2646.

[4] FUERTES, GARCÍA SIERRA, IGLESIAS, LOPEZ, MARTINEZ, PEREZ (2002). “Modelación y diseño de redes de abastecimiento de agua”. Grupo Mecánica de Fluidos. Dep. Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

[5] GOLBERG, D.E; HSING KUO, C (1987). “Genetic Algorithms in Pipeline Optimization”. Journal of Computing in Civil Engineering, Vol. 1, nº 2, 148-141.

[6] HOLLAND, J.H (1992). “Algoritmos Genéticos. Investigación y Ciencia”. Septiembre 1992. 38-45

[7] IGLESIAS, P.L.; LÓPEZ, P.A.; MARTÍNEZ, F.J.; PÉREZ, R. (2002). "Dimensionado económico de impulsiones mediante algoritmos genéticos". II Seminario Hispano-Brasileño sobre Planificación Proyecto y Operación de Redes de Abastecimiento de Agua. Valencia, 10-12 diciembre, 2002.

[8] IGLESIAS, P.L.; MORA, D; FUERTES, V; MARTÍNEZ, F.J. (2006). "Análisis estadístico de soluciones de diseño de Redes de Abastecimiento de Agua mediante Algoritmos Genéticos". XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Ciudad Guayana. Venezuela.

[9] IGLESIAS, P. L. (2003). "Desarrollo de una herramienta para modelación de sistemas de abastecimiento de agua utilizando sistemas de información geográfica y algoritmos genéticos (MAGIAS)". Memoria del Proyecto de Investigación nº DPI2003-02676 del Ministerio de Ciencia y Tecnología (España).

[10] IGLESIAS, P.L.; LÓPEZ, P.A.; LÓPEZ, G. y MARTÍNEZ, F.J. (2004). "Epanet 2.0vE. Manual de usuario". Ed. Grupo Multidisciplinar de Modelación de Fluidos, Valencia. (Traducción comentada del texto original de Rossmann, L. Epanet 2.0 Users Manual).

[11] IGLESIAS, P.L. (2001). "Modelo general de análisis de redes hidráulicas a presión en régimen transitorio". Tesis Doctoral – Dpto. Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia.

[12] KESSLER, A.; SHAMIR, U. (1997). "Decomposition technique for optimal design of water suplí systems". Engineering Optimization. Vol 17. nº 1. pp. 1-19.

[13] MATÍAS, A. (2003). "Diseño de redes de distribución de agua contemplando la fiabilidad mediante algoritmos genéticos". Tesis Doctoral – Dpto. Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia.

[14] MATIAS, A. (2004). "Etapas en el diseño de redes distribución de agua mediante algoritmos genéticos". III Seminario hispano-brasileño sobre Planificación, Proyecto y Operación de Redes de Abastecimiento de Agua. Valencia.

[15] SAVIC, D.A y WALTERS, G.A (1997). "Genetic Algorithms for Least-Cost Design of water Distribution Systems". Journal of Water Resources Planning and Management, Vol 125. nº2, 67-77.

Agradecimientos

El desarrollo de este trabajo ha sido posible gracias el Ministerio de Ciencia y Tecnología de España, quién ha financiado el proyecto de investigación titulado Desarrollo de una herramienta para modelación de sistemas de abastecimiento de agua utilizando sistemas de información geográfica y algoritmos genéticos (MAGIAS), cuyo detalle puede verse en Iglesias (2003).

Correspondencia (Para más información contacte con):

Universidad Politécnica de Valencia – Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente – Grupo Multidisciplinar de Modelación de Fluidos – Camino de Vera S/N – CP 46022 – Valencia (España) – Tel: 34 96 3879890 – Fax: 34 96 3877981 E-mail: damome@doctor.upv.es. URL: http://www.gmmf.upv.es